

Vratislav BLECHA<sup>1</sup>

## OPRAVY NA DENNÍ VARIACE TÍŽE PŘI MIKROGRAVIMETRICKÝCH MĚŘENÍCH ELIMINATION OF DIURNAL VARIATION OF GRAVITY FROM MICROGRAVITY MEASUREMENTS

### Abstract

Diurnal variations of gravity have to be registered during any microgravity survey and for any type of gravimeter. Modern digital gravimeters with resolution of 1  $\mu\text{Gal}$  remove tides and long term drift by means of embedded software. Nonetheless, there are residual tides and short term drift which have to be registered and removed during microgravity measurements. Common procedure for recording of time variation of gravity is reoccupation of base station in an appropriate time interval. Time variations are then linearly apportioned to all intervening measurements at the field stations. Gravimeter, however, is a mechanical device and each measurement at the base station is composed of two parts, systematic and erratic one. This is the reason for suggestion to approximate base station readings by smooth curve. This smooth curve will show systematic time variations of gravity, which are common to all measured stations. For the systematic part should be all measurements corrected. Erratic part, which is related to each specific measurement, is excluded by this procedure. Proposed method was tested in the field using gravimeter Scintrex CG-3M.

### Úvod

S vývojem nových digitálních gravimetrů s citlivostí 1  $\mu\text{Gal}$  souvisí stále výraznější podíl mikrogravimetrie při řešení problémů mělké geologie (Blecha, 2004). Abychom efektivně využili vysokou citlivost gravimetrů, zvyšují se nároky nejen na preciznost terénních prací ale i na metodiku zpracování dat.

Mikrogravimetrická měření nejčastěji zpracováváme do formy relativních Bouguerových anomálií, které počítáme podle vztahu

$$\Delta g_{Br} = g - g_L + g_H - g_B + g_T \quad (1)$$

kde  $\Delta g_{Br}$  je relativní Bouguerova anomálie v bodě S na zemském povrchu,  $g$  je relativní hodnota měřené tíže v bodě S opravená o vliv časových variací tíže,  $g_L$  je oprava na zeměpisnou šířku,  $g_H$  Fayeova redukce,  $g_B$  je gravitační účinek Bouguerovy desky a  $g_T$  je topokorekce. Znaménka u členů v rovnici (1) platí za předpokladu, že relativní hodnoty výšek gravimetrických bodů jsou nezáporné, měření je prováděno nad hladinou moře (resp. referenčního elipsoidu) a nezáporná je i hodnota členu  $g_L$  na nejnižším bodu měření (na severní polokouli).

Problematika zpracování mikrogravimetrických měření je v poslední době poměrně často zmiňována v odborné literatuře, např. Debeglia a Dupont (2002), Rybakov a kol. (2001), Yule a kol. (1998). Avšak problematika časových korekcí je většinou odbyta konstatováním, že měřená tíže byla opravena o slapové účinky a chod gravimetru. Časovým korekcím tíže je věnována okrajová pozornost i přesto, že je to jeden ze způsobů, kterým můžeme zvýšit kvalitu dat získaných během mikrogravimetrických měření.

### Činitelé ovlivňující denní variace tíže

Časové změny tíže zaznamenávané během dne na jednom bodě způsobují jak vnější faktory, tak chování vnitřního systému gravimetru. Tyto zdánlivé změny tíže nazýváme chod gravimetru. Hlavní zdroje denních variací tíže jsou:

---

<sup>1</sup> RNDr., CSc., Univerzita Karlova Praha, Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2, [vblecha@natur.cuni.cz](mailto:vblecha@natur.cuni.cz)

Slapy způsobené Sluncem a Měsícem. Denní změny tíže způsobené Sluncem a Měsícem mohou činit až 300  $\mu\text{Gal}$  (Telford et al., 1990). Tyto slapové účinky se nechají spočítat jako funkce zeměpisných souřadnic místa měření a světového času. Nové digitální gravimetry slapové účinky automaticky odstraňují během měření. Takto spočtené slapové účinky však nezahnují gravitační efekt vlastní deformace Země, tzv. reziduální slapy. Reziduální slapy mají amplitudy řádově jednotky  $\mu\text{Gal}$ .

Tíhová měření konané v blízkosti moře mohou být ovlivněna denními změnami ve výšce hladiny moře. V extrémním případě, když je měření prováděné na útesu nad mořským pobřežím, může změna výšky hladiny o 1 m způsobit změnu tíže o 21  $\mu\text{Gal}$ .

Atmosférický tlak. Změna hmotnosti sloupce vzduchu nad tíhovým bodem způsobí změnu v měřené tíži. Experimentální závislost změny tíže na tlaku vzduchu uvádí Merriam (1992) jako 0.36  $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$ .

Seismický šum. Zdroje seismického šumu jsou jak přirozené, tak umělé. Mezi přirozené zdroje patří zemětřesení, mikroseismické otřesy, přímé nárazy větru nebo chvění půdy způsobené kořeny stromů za větru. Umělé zdroje otřesů jsou např. stavební či vrtné práce, běžící motory, průjezd dopravních prostředků, apod.

Chod gravimetru. Všechny relativní pružinové gravimetry vykazují chod způsobený stárnutím mechanických součástí. Dlouhodobý chod je přibližně lineární u všech typů gravimetrů. Vyšší je u gravimetrů s křemennými pružinami (Scintrex), nižší u gravimetrů s kovovými pružinami (LaCoste & Romberg). U gravimetrů Scintrex činí dlouhodobý chod řádově stovky  $\mu\text{Gal}$  za den. Digitální gravimetry odstraňují dlouhodobý chod automaticky během měření. Tímto postupem ale neodstraníme krátkodobý chod gravimetru, který je nelineární a řádově se pohybuje v hodnotách jednotek až prvních desítek  $\mu\text{Gal}$ . Tento chod musíme při mikrogravimetrických měřeních registrovat pomocí opakovaných měření na opěrném bodě.

Elastická relaxace pružin. K tomuto efektu dochází vždy, když závaží zavěšené na měřící pružině opouští základní (nulovací) polohu. Pružina se nevrací na svou základní délku okamžitě, ale s časovým zpožděním přibližně exponenciálně. Tento jev je markantní při zapnutí gravimetrů s aretací (LaCoste & Romberg), u nearetovaných gravimetrů (Scintrex) se projevuje v případech, kdy gravimetr není dostatečně horizontován v delších časových intervalech mezi měřeními. Relaxační efekt se pohybuje v řádech prvních desítek  $\mu\text{Gal}$  a jeho podstatnou část můžeme odstranit rutinní terénní procedurou, kdy měření na jednotlivých bodech provádíme ve stejné oblasti relaxační křivky.

Mechanické vibrace při transportu. Mechanické vibrace gravimetru ovlivňují chod gravimetru a vznikají při transportu gravimetru v dopravním prostředku, při přenášení gravimetru mezi body měření v terénu a při pokládání gravimetru na stativ.

Teplotní změny. Všechny nově vyráběné gravimetry mají termostat a vnitřní stabilizace změn teploty se pohybuje v řádu  $10^{-5}$   $^{\circ}\text{C}$ . Avšak v případech teplotních šoků, kdy je např. gravimetr v terénu vyložen z automobilu, nebo přenesen z vytápěné místnosti, může dojít k časové prodlevě v kompenzaci teplotních změn. Drastické teplotní šoky vznikají v případě, že je gravimetr na delší dobu odpojen od elektrického zdroje (sítě či baterie). Provozní teplota uvnitř gravimetru se sice obnoví rychle, ale fyzikální efekty spojené se změnou teploty pružin způsobují anomální chod gravimetru a doznívají po dobu jednoho i více dní. Malé změny v záznamu tíže pozorujeme i při výměně baterií v gravimetru během měření v terénu.

Všechny nové digitální gravimetry zůstávají mechanickými přístroji, každý gravimetr se chová jinak a každý má svůj vlastní chod. To je důvod, proč je nezbytné registrovat denní variace tíže stejným přístrojem, kterým měříme na řadových bodech v terénu.

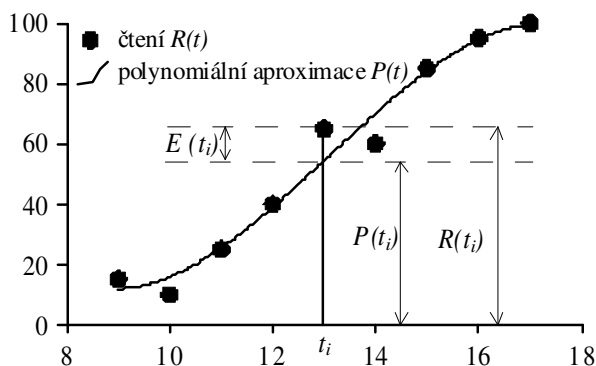
## Opravy na denní variace tíže

Denní variace tíže se pohybují v rozsahu stovek  $\mu\text{Gal}$ . Jestliže měříme s digitálními gravimetry, které odstraňují dlouhodobý chod a slapové účinky Slunce a Měsíce, sníží se rozsah reziduálních změn tíže na hodnoty řádově desítky  $\mu\text{Gal}$ . Při mikrogravimetrických průzkumech často vyhledáváme objekty, které se projevují amplitudou anomálie kolem 10  $\mu\text{Gal}$ . Z toho je zřejmé, že při přesných měřeních musíme registrovat denní variace tíže u všech typů gravimetrů včetně gravimetrů digitálních.

Denní variace tíže registrujeme na opěrném bodě. Interval měření závisí na přesnosti, které potřebujeme dosáhnout. I při nejpřesnějších měřeních se stačí vracet na opěrný bod v intervalu cca 1 hodina, protože během této doby jsou změny tíže převážně lineární (Yule et al., 1998).

Při opravě na denní variace tíže stojíme před problémem, kdybychom potřebovali současně měřit tíži jedním přístrojem na dvou místech – na řadovém i opěrném bodě. Jelikož nemůžeme být současně na dvou místech, pomáháme si tím, že průběh tíže na opěrném bodě nahradíme matematickou funkcí. Běžný postup je lineární interpolace mezi po sobě následujícími čteními na opěrném bodě (Seigel, 1994). Tato metoda je i součástí komerčně nabízených specializovaných programů pro zpracování tíhových dat. Běžně se také používá při opravě na denní variace geomagnetického pole při magnetometrickém průzkumu.

Podle zkušeností z terénních tíhových měření však ve většině případů dává lepší výsledky než lineární interpolace, aproximace reziduálního chodu hladkou algebraickou křivkou (Obr.1). Příčinou je skutečnost, že gravimetr je mechanický přístroj a každá změřená hodnota na opěrném bodě se skládá ze dvou částí: systematické a nahodilé. Systematickou část tvoří reziduální slapy a reziduální chod gravimetru. Zdrojem nahodilé části čtení na opěrném bodě jsou např. nárazy větru během měření, průjezd dopravního prostředku, transport gravimetru mezi body měření, otřes gravimetru při pokládání na stativ apod. Hladkou algebraickou křivkou vystihneme systematickou část časových změn tíže, které jsou společné pro všechny měřené body v daném regionu a časovém intervalu. O tyto systematické změny opravíme hodnoty změřené na řadových bodech. Nahodilá část časových změn, nebo jednoduše chyba, která je spojená s každým čtením na opěrném bodě, je tímto postupem vyloučena.



**Obr.1** Čtení na opěrném bodě  $R(t_i)$  v čase  $t_i$  je a) skládá ze systematické části  $P(t_i)$  a nahodilé části  $E(t_i)$ .

Systematickou část chodu aproximujeme polynomelem proloženým čtením na opěrném bodu metodou nejmenších čtverců. Vystává otázka optimálního stupně polynomu. Obecně platí, že optimální metoda odstranění chodu je ta, pro kterou vyjde nejmenší chyba měření spočítaná z opakovaných měření na řadových bodech v terénu. To neplatí jen pro stupeň polynomiální křivky, ale pro každou jinou metodu odstranění chodu. Vzhledem k tomu, že reziduální časové změny obsahují i reziduální slapové účinky a nejkratší perioda slapových vln je 12 hodin, dává často nejlepší výsledky proložení polynomu 3. stupně. Chod se pak určuje podle rovnice

$$P(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (2)$$

kde  $t$  je čas měření a neznámé koeficienty  $a_i$  se počítají metodou nejmenších čtverců. Člen  $g$  v rovnici (1) se určuje podle vzorce

$$g = g_{BS} + [R(t_i) - P(t_i)]k \quad (3)$$

kde  $g$  [ $\mu\text{Gal}$ ] je měřená tíže opravená o časové variace,  $g_{BS}$  [ $\mu\text{Gal}$ ] je tíže na opěrném bodě,  $R(t_i)$  [čtecí jednotka] je čtení gravimetru na řadovém bodě v čase  $t_i$ ,  $P(t_i)$  [čtecí jednotka] je čtení gravimetru na opěrném bodě v čase  $t_i$  aproximované polynomem  $P$ ,  $k$  [ $\mu\text{Gal}/\text{čtecí jednotka}$ ] je konstanta gravimetru. Čtecí jednotky jsou libovolné. Mohou to být dílky stupnice (u starších gravimetrů s měřicím šroubem), milivolty (u gravimetrů, který mají zabudován elektronický feedback), nebo mGal (u moderních digitálních gravimetrů).

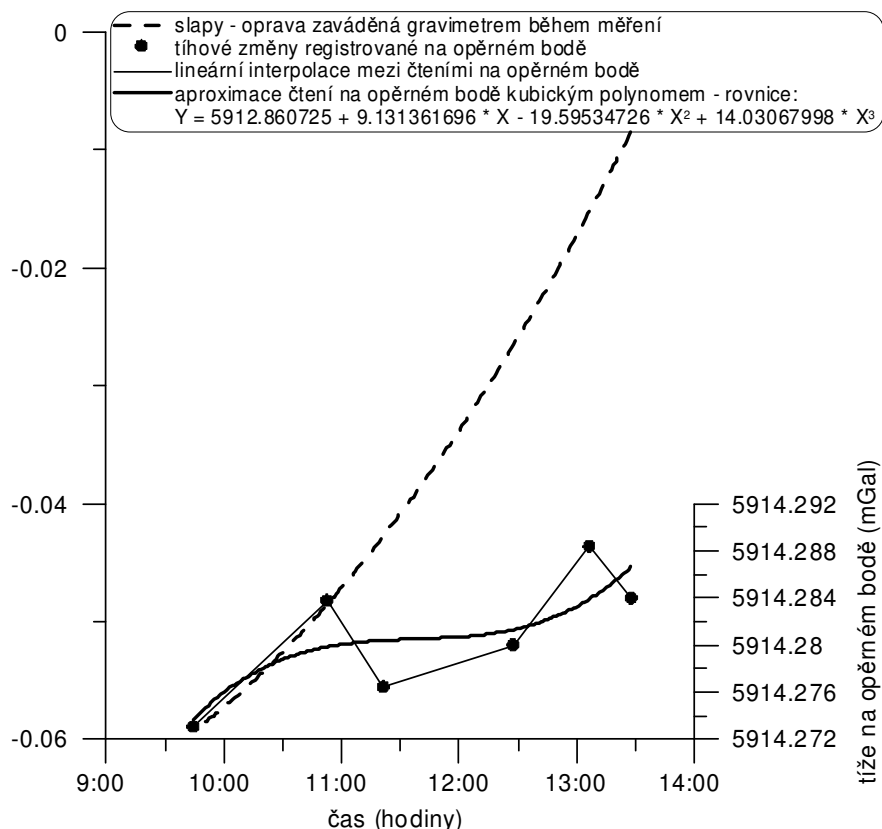
Při každém mikrogravimetrickém průzkumu opakujeme 5 – 10 % měření na řadových bodech, kvůli výpočtu chyby měření. Tento údaj je potřebný k rozhodnutí jak velkou amplitudu anomálie můžeme považovat za věrohodnou. Opakovaná měření vykonáváme v různých časech, nejlépe v různých dnech, pokud průzkum trvá déle. Opakovaná měření na vybraných bodech neslouží v tomto případě přímo ke zvýšení přesnosti, ale ke kontrole kvality měření. Pokud na každém kontrolním bodě měříme pouze dvakrát, počítáme empirickou střední chybu měření na jednom bodě podle vzorce

$$E = \pm [\sum d^2/2n]^{1/2} \quad (4)$$

kde  $d$  je rozdíl dvou měření na jednom bodě,  $n$  je počet opakovaných bodů. Takto počítaná chyba zahrnuje i chybu ze zavedení oprav na časové změny tíže a není srovnatelná se standardní odchylkou několika po sobě následujících měření na jednom bodě nebo průměrem těchto odchylek z měření na více bodech.

### **Praktický příklad**

Na Obr. 2 je záznam měření na opěrném bodě pro gravimetr Scintrex CG-3M. Příklad je z mikrogravimetrického průzkumu prováděného v r. 2003 v severních Čechách. Cílem průzkumu bylo nalezení podpovrchových dutin a oslabených zón způsobených povodní na Labi v r. 2002.



**Obr.2** Příklad záznamu reziduálních variací tíže na opěrném bodě pro gravimetr Scintrex CG-3M. Opravu na časové změny můžeme provést pomocí lineární interpolace (tenká čára) mezi jednotlivými čteními na opěrném bodě (černé body), nebo polynomiální aproximací (silná čára). Pro srovnání je v grafu vynesena oprava na slapové účinky Slunce a Měsíce (čárkovaná čára), kterou zavádí gravimetr automaticky během měření.

Gravimetr Scintrex CG-3M odstraňuje hlavní část denních změn tíže pomocí vnitřního programového vybavení. Automaticky se odstraňuje dlouhodobý lineární chod a gravitační účinky Slunce a Měsíce počítané podle Longmanova (1959) vzorce. Konstanta dlouhodobého chodu byla u použitého gravimetru v době průzkumu 0.222 mGal/den. Slapy se měnily během 4 hodin v rozsahu 60  $\mu$ Gal, reziduální časové variace v rozsahu 20  $\mu$ Gal.

V uváděném příkladu bylo během 4 hodin změřeno 50 tíhových bodů a 5 bodů bylo měřeno opakovaně v různém čase. Chyba měření počítaná podle vzorce (4) vyšla  $\pm 3.6 \mu$ Gal pro lineární interpolaci mezi po sobě následujícími záznamy na opěrném bodě. Chyba se snížila na hodnotu  $\pm 2.3 \mu$ Gal, když byla oprava na časové variace zavedena pomocí polynomu 3. stupně. Z toho plyne, že oprava všech měřených bodů pomocí polynomiální aproximace časových změn tíže dává v tomto případě přesnější gravimetrické podklady pro následnou geologickou interpretaci.

## Závěr

Nové digitální gravimetry automaticky odstraňují z měřených hodnot tíže dlouhodobý chod a slapové účinky Slunce a Měsíce. Podstatná část denních variací tíže (řádově stovky  $\mu$ Gal) je tak eliminována během měření. Avšak zůstává reziduální chod a reziduální slapy (řádově desítky  $\mu$ Gal), které můžeme zanedbat při regionálních průzkumech, ale při přesných měřeních je musíme registrovat a měření o ně opravit. Při mikrogravimetrických měřeních denní variace tíže obvykle registrujeme pomocí opakovaných měření na opěrném bodě.

Zpracování záznamu tíhových měření na opěrném bodě ovlivňuje výslednou kvalitu tíhových dat. Většinou se opravy na denní variace tíže počítají pomocí lineární interpolace mezi po sobě následujícími záznamy na opěrném bodě. Je to stejný postup jaký se používá při opravách na denní variace geomagnetického pole v magnetometrii. Avšak na rozdíl od magnetometru je gravimetr mechanický přístroj a každé jednotlivé měření je zatíženo individuální chybou. V tomto případě je proto opodstatněný jiný postup – aproximace denních variací tíže hladkou křivkou.

Který ze způsobů odstranění denních variací tíže je optimální při konkrétním průzkumu, závisí na hodnotě chyby spočítané z opakovaných měření na řadových bodech. Pokud nám tedy záleží na dosažení co nejvyšší přesnosti, použijeme několik metod odstranění chodu a postup, který dává nejmenší hodnotu chyby, je v daném případě nejlepší a použijeme jej pro opravu všech naměřených dat.

Z praxe vyplývá, že optimální výsledky dává ve většině případů proložení polynomu 3. stupně. Reziduální denní variace tíže zaznamenávané digitálními gravimetry obsahují jak reziduální chod, tak reziduální slapové účinky. Důvodem, nebo alespoň jedním z důvodů, proč právě kubický polynom dává často nejlepší výsledky při odstranění denních variací tíže je fakt, že nejkratší vlnová délka slapů (úplný sinus) má periodu 12 hodin. Tento charakter časových změn tíže dobře vystihuje právě kubický polynom a měřicí cyklus, ve kterém aplikujeme časové korekce, zřídka kdy přesáhne 12 hodin.

#### *Poděkování*

*Příspěvek vznikl za finanční podpory Grantové agentury České republiky (grant č. 205/05/0156).*

#### **Literatura**

- [6] Blecha, V. (2004): Aplikace mikrogravimetrie v inženýrské geologii. – Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, ročník IV, č. 2, str. 49-55.
- [7] Debeglia, N., Dupont, K. (2002): Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. – Journal of Applied Geophysics, 50, 435-454.
- [8] Longman, I.M. (1959): Formulae for computing of the tidal acceleration due to the Moon and the Sun. Journ. of Geoph. Research, 64, 2351 – 2355
- [9] Merriam, J.B. (1992): Atmospheric pressure and gravity. - Geophysical Journal International, 109, 488-500.
- [10] Rybakov, M., Goldsmidt, V., Fleischer, L., Rotstein, Y. (2001): Cave detection and 4-D monitoring: A microgravity case history near Dead Sea. - The Leading Edge, 20, 896-900.
- [11] Seigel, H.O. (1994): A guide to high precision land gravimeter surveys. - Internal Report, Scintrex Limited, 95 p.
- [12] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1992): Applied Geophysics. - Cambridge University Press, 770 p.
- [13] Yule, D.E., Sharp, M.K., Butler, D.K. (1998): Microgravity investigations of foundation conditions. - Geophysics, 63, 95-103.